

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-307344

(43)Date of publication of application : 23.10.2002

(51)Int.CI.

B25J 9/10
G05B 19/404

(21)Application number : 2001-116693

(71)Applicant : FANUC LTD

(22)Date of filing : 16.04.2001

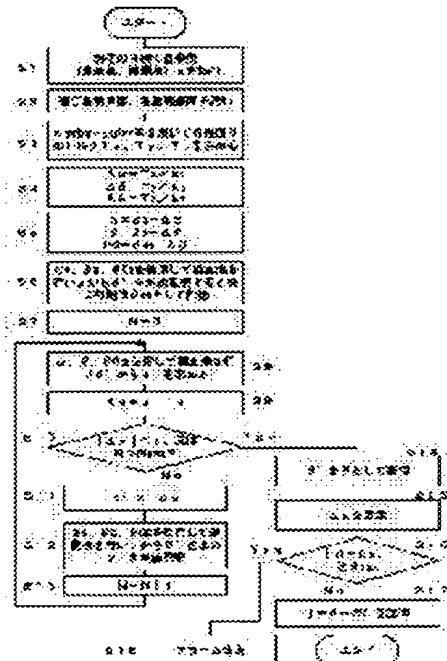
(72)Inventor : WATANABE ATSUSHI
KATO TETSURO
TSUCHIDA YUKINOBU

(54) ROBOT CONTROL DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To improve the position and attitude accuracy to enable the high-speed operation by correcting a deflection in a multi-joint robot.

SOLUTION: Torsion (deflection) $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\theta$ are obtained on the basis of the torque T_x-T_z around a shaft of a coordinate system provided in each joint part and spring constants k_x-k_z (S3, S4). Torsional quantity is added to correction D-H parameters α_s , β_s , θ_{0s} in the case of the torsion θ to obtain parameters α , β , θ_0 (S5). Rotation angle θ' (θ_{0s}) is obtained by reversely converting from a target position x by using the parameters α_s , β_s , θ_{0s} (S6). A position x' is obtained by normally converting from the rotation angle θ' by using the parameters α , β , θ_0 to obtain a difference Δx between the target position (S8, S9). This difference Δx is corrected to obtain a new target position x (S11). Reverse conversion and normal conversion are repeated each other, and the rotation angle θ when the difference Δx becomes the predetermined value or less is set as θ after the correction, and a command rotation angle j , of which deflection is corrected, is obtained.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]	16.04.2001
[Date of sending the examiner's decision of rejection]	02.12.2003
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]	
[Date of final disposal for application]	
[Patent number]	
[Date of registration]	
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]	2004-00157
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]	05.01.2004
[Date of extinction of right]	

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-307344

(P2002-307344A)

(43)公開日 平成14年10月23日 (2002.10.23)

(51)Int.Cl.*

B 25 J 9/10
G 05 B 19/404

識別記号

F I

B 25 J 9/10
G 05 B 19/404

コード(参考)

A 8 C 007
E 5 H 269

審査請求 有 請求項の数10 O.L (全 10 頁)

(21)出願番号 特願2001-116693(P2001-116693)

(71)出願人 390008235

(22)出願日 平成18年4月16日 (2001.4.16)

ファンック株式会社

山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580番地

(72)発明者 梶辺 淳

山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580番地 ファンック株式会社内

(72)発明者 加藤 哲朗

山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580番地 ファナック株式会社内

(74)代理人 100082304

弁理士 竹本 松司 (外4名)

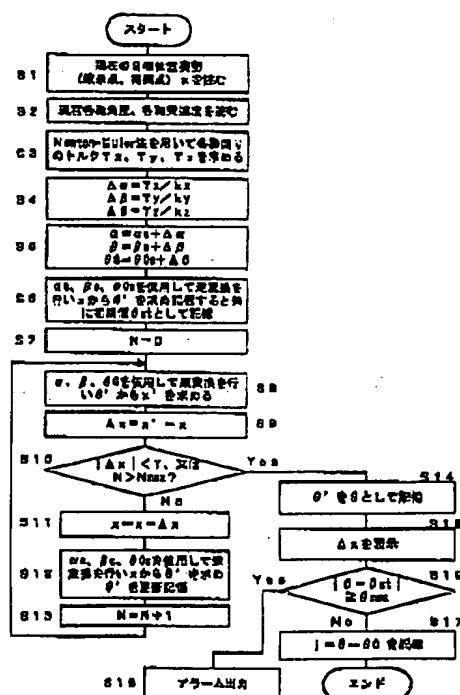
最終頁に続く

(54)【発明の名称】ロボット制御装置

(57)【要約】

【課題】多関節ロボットにおけるたわみ分を補正し、位置姿勢精度を向上し、高速動作を可能とする。

【解決手段】各関節部に設けた座標系の軸回りのトルク $T_x \sim T_z$ とバネ定数 $k_x \sim k_z$ によりねじれ(たわみ) $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\theta$ を求める(S3, S4)。ねじれ「0」のときの修正D-Hパラメータ $\alpha_s, \beta_s, \theta_{0s}$ にねじれ量を加算し、パラメータ α, β, θ_0 を求める(S5)。パラメータ $\alpha_s, \beta_s, \theta_{0s}$ を使用し目標位置 x から逆変換して回転角 θ' (θ_{st}) を求める(S6)。又パラメータ α, β, θ_0 を使用して回転角 θ' から順変換して位置 x' を求め、目標位置との差分 Δx を求める(S8, S9)。この差分 Δx を補正し、新たな目標位置 x とする(S11)。以下逆変換、順変換を交互に繰り返し、差分 Δx が所定値以下になったときの回転角 θ を補正後の θ とし、これよりたわみ補正された指令回転角 j を求める(S8~S17)。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 ロボットの各リンクをそれぞれのアクチュエータで駆動するロボットの制御装置であって、教示プログラムに基づくロボットの手先の目標位置姿勢における各関節部に発生するたわみ又は前記各関節部及び各リンクに発生するたわみを求めるたわみ算出手段と、該求められたたわみに基づいて前記手先の目標位置とのずれ及び／又は前記手先の目標姿勢とのずれを求める手先ずれ算出手段と、該ずれと大きさが等しく、方向が逆向きの補正を加えた手先の位置及び／又は姿勢に動作させ10るアクチュエータの位置を求める補正位置算出手段とを備えたロボット制御装置。

【請求項2】 前記たわみ算出手段は、前記各関節部分のたわみと前記リンクのたわみを分離した形で求めることを特徴とする請求項1記載のロボット制御装置。

【請求項3】 前記補正位置算出手段は、たわみを考慮した順変換処理とたわみを無視した逆変換処理を交互に繰り返し行う収束計算により求める請求項1又は請求項2記載のロボット制御装置。

【請求項4】 前記たわみ補正による補正を行う前と行20った後の前記アクチュエータの位置の差分を求める手段を設け、この差分がしきい値を越えているときには、アラーム処理を行う請求項1乃至3の内いずれか1項記載のロボット制御装置。

【請求項5】 前記補正位置算出手段は、サーボ制御のための計算周期よりも長い周期で補正されたアクチュエータの位置を求める請求項1乃至4の内いずれか1項記載のロボット制御装置。

【請求項6】 前記周期で求められた補正後のアクチュエータの位置を内挿補間して、指令位置として各関節部30のアクチュエータに出力する請求項5記載のロボット制御装置。

【請求項7】 前記求めた手先の目標位置とのずれ及び／又は手先の目標姿勢とのずれを表示する手段を備えたことを特徴とする請求項1乃至6の内いずれか1項記載のロボット制御装置。

【請求項8】 前記手先に取り付けられたツールに生じたたわみが生じる軸を指定する手段と、該軸回りのたわみを求め、該たわみによる手先の位置ずれ及び／又は姿勢のずれを補正する手段とを備えた請求項1記載のロボ40ット制御装置。

【請求項9】 前記たわみ算出手段において使用される剛性パラメータは、ロボットを動作させた手先の位置又は姿勢とそのとき作用するモーメントにより最適値を求める請求項1乃至8の内いずれか1項記載のロボット制御装置。

【請求項10】 ロボットの各リンクをそれぞれのアクチュエータで駆動し、ロボット手先を押し付けて作業するロボットの制御装置であって、ロボット手先を対象物に押し付けたときの反力を検出するセンサと、教示プロ50

2

グラムに基づくロボットの手先の目標位置姿勢における各関節部に発生するたわみ又は前記各関節部及び各リンクに発生するたわみを求めるたわみ算出手段と、該求められたたわみに基づいて前記手先の目標位置とのずれ及び／又は前記手先の目標姿勢とのずれを求める手先ずれ算出手段と、該ずれと大きさが等しく、方向が逆向きの補正を加えた手先の位置及び／又は姿勢に動作させるアクチュエータの位置を求める補正位置算出手段とを備えたロボット制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、多関節ロボットの制御装置に関する。特にロボット機構部のたわみを考慮した高精度の位置姿勢が得られるロボット制御装置に関する。

【0002】

【従来の技術】ロボットの軽量化、ロボット動作速度の高速化への要求が高まるにつれ、ロボット機構部のたわみが大きくなり、精度に及ぼす影響が無視できなくなつてきている。このような要望に対して、従来のロボットでは、1軸毎の減速器の低剛性に起因する2慣性モデルのたわみの補償にて高精度の軌跡制御を盛んに行って来た。また、ロボットアーム自身に関しては、無次元（共振周波数の2次モード、3次モード・・・が存在する。）の1軸柔軟アームをはりの方程式からモデル化し、低次元化し制御していた。又、特許第3120028号公報等には、アーム（リンク）の弾性変形の制御を簡易的にモータ回転方向の成分に分解して制御する方法が提案されている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】多関節ロボットになると、1軸の制御では問題とならなかった、軸の影響がでて、運動を増幅させ振動するというような問題が発生する。又、柔軟アームの制御では計算処理時間がかかるという欠点がある。又、多軸まで考慮されることは今まで存在しなかった。さらに、前述した特許第3120028号公報で開示されているものは、アーム（リンク）の弾性変形を非常に簡単に考慮しているだけであるため、完全な制御ができなかった。

【0004】そこで、本発明は、上述した従来技術の問題点を改善することにある。

【0005】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本願請求項1に係わる発明は、ロボットの各リンクをそれぞれのアクチュエータで駆動するロボットの制御装置であって、教示プログラムに基づくロボットの手先の目標位置姿勢における各関節部に発生するたわみ又は前記各関節部及び各リンクに発生するたわみを求めるたわみ算出手段と、該求められたたわみに基づいて前記手先の目標位置とのずれ及び／又は前記手先の目標姿勢と

3

のずれを求める手先ずれ算出手段と、該ずれと大きさが等しく、方向が逆向きの補正を加えた手先の位置及び／又は姿勢に動作させるアクチュエータの位置を求める補正位置算出手段とを設けることによって、ロボット全体のたわみを補正して目標とする位置姿勢に位置決めすることができる。

【0006】又、請求項2に係る発明は、前記たわみ算出手段において、前記各関節部分のたわみと前記リンクのたわみを分離した形で求めるようとする。さらに、請求項9に係る発明は、前記補正位置算出手段を、たわみを考慮した順変換処理とたわみを無視した逆変換処理を交互に繰り返し行う収束計算により行うものとした。

【0007】さらに、請求項4に係る発明は、さらに、前記たわみ補正による補正を行う前と行った後の前記アクチュエータの位置の差分を求める手段を設け、この差分がしきい値を越えているときには、アラーム処理を行うようにした。請求項5に係る発明は、前記補正位置算出手段による補正されたアクチュエータの位置を求める周期を、サーボ制御のため計算周期よりも長い周期とした。そして、請求項6に係る発明は、この周期で求められた補正後のアクチュエータの位置を内挿補間して、指令位置として各関節部のアクチュエータに出力するようにした。

【0008】請求項7に係る発明は、前記求めた手先の目標位置とのずれ及び／又は手先の目標姿勢とのずれを表示する手段を備えるものとした。又、請求項8に係る発明は、前記手先に取り付けられたツールに生じるたわみが生じる軸を指定する手段と、該軸回りのたわみを求め、該たわみによる手先の位置ずれ及び／又は姿勢のずれを補正する手段とをさらに追加して、ツールのたわみも補正できるようにした。請求項9に係る発明は、前記たわみ算出手段において使用される剛性パラメータは、ロボットを動作させた手先の位置又は姿勢とそのとき作用するモーメントにより最適値を求めるようにした。

【0009】又、請求項10に係る発明は、ロボットの各リンクをそれぞれのアクチュエータで駆動し、ロボット手先を押し付けて作業するロボットの制御装置であ

$$A = \begin{bmatrix} C\theta C\beta - S\theta S\alpha S\beta & -S\theta C\alpha & C\theta S\beta + S\theta S\alpha C\beta & \alpha C\beta \\ S\theta C\beta + C\theta S\alpha S\beta & C\theta C\alpha & S\theta S\beta - C\theta S\alpha C\beta & \alpha S\beta \\ -C\alpha S\beta & S\alpha & C\alpha C\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

.....(1)

ただし、 $C\theta = \cos(\theta)$ 、 $S\theta = \sin(\theta)$ 等

4

って、ロボット手先を対象物に押し付けたときの反力を検出するセンサと、教示プログラムに基づくロボットの手先の目標位置姿勢における各関節部に発生するたわみ又は前記各関節部及び各リンクに発生するたわみを求めるたわみ算出手段と、該求められたたわみに基づいて前記手先の目標位置とのずれ及び／又は前記手先の目標姿勢とのずれを求める手先ずれ算出手段と、該ずれと大きさが等しく、方向が逆向きの補正を加えた手先の位置及び／又は姿勢に動作させるアクチュエータの位置を求める補正位置算出手段とを備え、ロボット手先を対象物に押し付けたときに生じる反力によるたわみを補正してロボットの位置姿勢を目標値に保持できるようにした。

【0010】

【発明の実施の形態】本発明の一実施形態を6軸垂直多関節ロボットを制御するロボット制御装置を例にとって、まず本発明の原理方法について説明する。他の型のロボットにおいても同様である。又、ロボットの物理パラメータとして、例えば、修正D-Hパラメータを用いる。他のパラメータを用いた場合も同様である。

【0011】ロボットの手先のワールド座標系上の位置姿勢 x は、次の式で表される。

【0012】 $x = A_0 A_1 \cdots A_6 x_i$

上記式において、 x_i はツール座標系上の手先位置であり、 A_0 から A_6 は 4×4 の座標変換行列である。この座標変換を表すパラメータとして、修正D-Hパラメータ(d 、 a 、 θ 、 α 、 β)が知られている。この修正D-Hパラメータは、図1に示すように、隣接する軸において、 a はX軸方向の軸間のオフセット値、 d はZ軸方向の軸間のオフセット値であり、 θ はZ軸回り、 α はX軸回り、 β はY軸回りの回転角である。通常は、剛性パラメータとして減速器の軸回りのバネ性のみを考え、Z軸回り回転 θ のみを問題としていたが、本発明においては、X軸回り、Y軸回りの回転角 α 、 β にもバネ性があると考え、この回転角、すなわち、ねじれをたわみとする。又、この修正D-Hパラメータを用いたときの座標変換行列 A (A_0 、 $A_1 \cdots A_6$)は次の(1)式で表される。

【0013】

【数1】

を用いて、まずバネ性を無視して、その時点の各軸の角度と指令速度から各関節部分にかかる力及びトルクを求める。この力及びトルクを求める計算量は、ロボットの軸数に比例して増大するが、比較的小さな計算量で求めることができる。

【0014】こうして求められた各関節のX、Y、Z軸回りのトルクを図2に示すように、Tx、Ty、Tzとし、X、Y、Z軸回りのバネ定数をkx、ky、kzとすると、X、Y、Z軸回りのねじれ量 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\theta$ は、それぞれ

$$\Delta\alpha = T_x / k_x$$

$$\Delta\beta = T_y / k_y$$

$$\Delta\theta = T_z / k_z$$

として求められる。なお、バネ定数をkx、ky、kzは予め測定しておく。

【0015】そして、以下の式により、修正D-Hパラメータを計算する。

$$[\text{0016}] \alpha = \alpha_s + \Delta\alpha$$

$$\beta = \beta_s + \Delta\beta$$

$$\theta = \theta_{0s} + \Delta\theta$$

なお、上記式において、 θ_0 は教示操作盤上で（指令上で）軸角度が「0」のときのこの修正D-Hパラメータにおける回転角 θ を示すものである。そして教示操作盤上で軸角度が j であるとすると、修正D-Hパラメータにおける回転角 θ は、「 $\theta = \theta_0 + j$ 」として表される。又、 α_s 、 β_s 、 θ_{0s} は、ねじれがないときの修正D-Hパラメータ α 、 β 、 θ であり、これらの修正D-Hパラメータは予めキャリブレーション等の方法で求めておく。

【0017】この修正D-Hパラメータ α 、 β 、 θ_0 を用いて、上記(1)式で示される座標変換行列Aを用いて逆変換を行ってロボットの手先（ツール先端点）の目

$$A =$$

$$\begin{bmatrix} C(\theta+2\gamma)C\beta - S(\theta+2\gamma)S\alpha S\beta & -S(\theta+2\gamma)C\alpha & C(\theta+2\gamma)S\beta + S(\theta+2\gamma)S\alpha C\beta & aC(\theta+\gamma) \\ S(\theta+2\gamma)C\beta + C(\theta+2\gamma)S\alpha S\beta & C(\theta+2\gamma)C\alpha & S(\theta+2\gamma)S\beta - C(\theta+2\gamma)S\alpha C\beta & aS(\theta+\gamma) \\ -C\alpha S\beta & S\alpha & C\alpha C\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

リンク全体のたわみをも考慮する場合は、上記(2)式で示される座標変換行列Aを用いる。なお、この場合、たわみがないときのリンク全体のたわみは「0」である。すなわち、 $\gamma_s = 0$ である。他は上述した関節部のねじれによる補正の場合と同一である。

【0021】以下、本発明の一実施形態について説明する。

標位置xから各軸角度 θ を求める。この各軸回転角 θ を求めるときは、逆変換と順変換を交互に行い、手先位置姿勢がの差分が所定値以下まで収斂するまで行い、所定値以下となったときの回転角 θ より指令回転角 j を求めて記憶する。この回転角 j は、関節部のX、Y、Z回りのねじれ（たわみ）を考慮した上で、ロボットの手先（ツール先端点）を目標点に動作させることができるものとなる。

【0018】上述した説明では、弾性が各関節部のX、Y、Z軸回りに存在するとしたものであるが、さらに、それ以外の部分、例えばアーム（リンク）の途中に弾性がある場合には、その部分にダミーの座標系を作り、ロボットの軸数をダミーを設けた数だけ増えたものとして、上述した方法により、ねじれ（たわみ）を考慮した上で、ロボットの手先（ツール先端点）の目標点を求める。

【0019】又、上述した説明では、リンク部分のたわみを3次元の座標系の関節部のねじれで仮定して説明している。リンク自体がたわむことにより、変化する姿勢の影響が含まれていない。減速器部分（関節部）のねじれとリンク全体におよぶたわみを別に考え、リンク全体の部分は姿勢に影響を及ぼすものとして、姿勢への影響への補正を与えるようとする。この場合、図3に示すように、リンクLが関節において $\Delta\theta$ たわむと共にリンクL全体が均等にたわむことによりリンク先端点が γ だけ回転した位置にきたとする。この時リンク先端の姿勢を考えると、図3に示すように直線Qで近似した場合に対して、さらに γ だけ姿勢が回転している。この場合の座標変換行列Aは次の(2)式となる。

【0020】

【数2】

..... (2)

【0022】図4は本発明の一実施形態の6軸垂直多関節ロボットの制御装置の要部ブロック図であり、従来の6軸垂直多関節ロボットの制御装置と同一構成である。符号7で示されるバスに、メインプロセッサ1、RAM、ROM、不揮発性メモリ（EEPROMなど）からなるメモリ2、教示操作盤用インターフェイス3、外部装置用のインターフェイス6及びサーボ制御部5が接続

7

されている。又、教示操作盤用インターフェイス3には教示操作盤4が接続されている。

【0023】ロボット及びロボット制御装置の基本機能を支えるシステムプログラムは、メモリ2のROMに格納されている。又、アプリケーションに応じて教示されるロボットの動作プログラム並びに関連設定データは、メモリ2の不揮発性メモリに格納される。メモリ2のRAMは、プロセッサ1が行う各種演算処理におけるデータの一時記憶の記憶領域として使用される。

【0024】サーボ制御部5は、サーボ制御器5a1～5a10a6を備えており、各サーボ制御器5a1～5a6は、プロセッサ、ROM、RAM等で構成され、各軸を駆動するサーボモータの位置・速度のループ制御、さらには電流ループ制御を行っている。いわゆる、ソフトウェアで位置、速度、電流のループ制御を行うデジタルサーボ制御器を構成している。サーボ制御器5a1～5a6の出力は各サーボアンプ5b1～5b6を介して各軸サーボモータM1～M6を駆動制御する。なお、図示はしていないが、各サーボモータM1～M6には位置・速度検出器が取り付けられており、該位置・速度検出器で検出した各サーボモータの位置、速度は各サーボ制御器5a1～5a6にフィードバックされるようになっている。又、入出力インターフェイス6には、ロボットに設けられたセンサや周辺機器のアクチュエータやセンサが接続されている。

【0025】上述したロボット制御装置の構成は、従来のロボット制御装置の構成と何等変わりはない。本実施形態は、このようなロボット制御装置において、ロボットの関節部及びリンクにおけるたわみを考慮し、このたわみ分を補正して各軸のアクチュエータであるサーボモータM1～M6を駆動し、ロボットの手先(ツール先端30点)を正確に目標位置姿勢どおりに駆動制御しようとするものである。

【0026】図5は、このロボット制御装置のプロセッサ1が実行する、関節部のたわみを考慮してロボットの手先(ツール先端点)の目標位置姿勢を求める補正処理のフローチャートである。この処理はサーボ制御における計算周期と同じ又はそれよりも長い所定周期で実行されるものである。なお、各種設定値は予め設定しておく。又各関節部の座標系における各軸回りのねじれがないときの修正D-Hパラメータ α_s 、 β_s 、 θ_{0s} はキャリブレーションによって求められ、設定されているものとする。さらに、各関節部の座標系における各軸回りの剛性パラメータのバネ定数 k_x 、 k_y 、 k_z も予め測定し設定しておく。

【0027】この剛性パラメータと各関節部の各軸回りのモーメント及び手先位置姿勢は次の関係にある。

【0028】 f (モーメント、剛性) = 手先位置又は姿勢

これより、

剛性 = f^{-1} (手先位置又は姿勢、モーメント)

8

よって、ロボットを動作させ、手先位置姿勢を測定し、かつ、Newton-Euler法等により各軸回りのモーメントを求め上記剛性パラメータ k_x 、 k_y 、 k_z を求めておく。

【0029】そこで、まず、教示プログラムを実行し、現時点で指令されている目標位置姿勢 x 、すなわち、教示点若しくは補間点 x を読む(ステップS1)。なお、この実施形態では、教示プログラムではワールド座標系に基づいた直交座標系での位置姿勢 x が指令されているものとする。

【0030】次に、この時点における各関節部の角度、各関節部の実回転速度を読み取る(ステップS2)。この読み取った各関節部の角度、各関節部の実回転速度に基づいてNewton-Euler法を用いて各関節部毎に各軸回りのトルク T_x 、 T_y 、 T_z を求める(ステップS3)。さらに、この各軸回りのトルク T_x 、 T_y 、 T_z を、予め測定され設定されている関節部の各軸のバネ定数 k_x 、 k_y 、 k_z でそれぞれ割り、各関節部毎にX、Y、Z軸回りのねじれ、すなわち、たわみ $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\theta$ を求める(ステップS4)。

【0031】このねじれ(たわみ) $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\theta$ に、それぞれキャリブレーションによって求められ設定されているねじれがないときの修正D-Hパラメータ α_s 、 β_s 、 θ_{0s} を加算して、ねじれ(たわみ) $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\theta$ を考慮した修正D-Hパラメータ α 、 β 、 θ_0 を求める(ステップS5)。そして、まず、ねじれがないときの修正D-Hパラメータ α_s 、 β_s 、 θ_{0s} を用いてステップS1で読み込んだ目標位置姿勢 x から逆変換して回転角 θ' を求め、この回転角 θ' を補正開始時の回転角 θ_{st} として記憶する(ステップS6)。

【0032】次に、カウンタNを「0」にセットして(ステップS7)、ステップS5で求めた修正D-Hパラメータ α 、 β 、 θ_0 を用いて、ステップS6で求めた回転角 θ' から順変換を行って、位置姿勢 x' を求める(ステップS8)、求めた位置姿勢 x' からステップS1で読み込んだ目標位置姿勢 x を減じてその差分 Δx を算出する(ステップS9)。この差分 Δx の絶対値が予め設定されている基準値Tより小さいか、又はカウンタNの値が設定値N_{max}を越えているか判断し(ステップS10)、差分 Δx の絶対値が基準値Tを越えていて、かつ、カウンタNの値が設定値N_{max}を越えていなければ、現在の目標位置姿勢 x からステップS9で算出した差分 Δx を減じて、新しい目標位置姿勢 x とする(ステップS11)。

【0033】次に、再びねじれがないときの修正D-Hパラメータ α_s 、 β_s 、 θ_{0s} を用いてステップS1で読み込んだ目標位置姿勢 x から逆変換して回転角 θ' を求め更新し(ステップS12)、カウンタNを1カウントアップし(ステップS13)、ステップS8に戻る。

【0034】以下、ステップS10で差分 Δx の絶対値

が基準値 T より小さくなるか、又は、カウンタ N の値が設定値 N_{max} を越えたと判断されるまで、ステップ S 8 からステップ S 13 の処理を繰り返し実行する。すなわち、順変換、逆変換を交互に繰り返し実行し、新しい目標位置姿勢を求めると共に、先に求めた目標位置姿勢と順変換して新たに求めた位置姿勢との差分 Δ x の絶対値が基準値 T より小さくなるまで実行する。差分 Δ x の絶対値が基準値 T より小さくなるか、若しくは、カウンタ N の値が設定値 N_{max} となると、ステップ S 10 からステップ S 14 に移行し、現在求められている回転角 θ' ¹⁰ を最終回転角 θ として記憶する（ステップ S 14）。

【0035】さらに、現在の差分 Δ x を表示する（ステップ S 15）。すなわち、目標手先位置 x、y、z との差分、目標姿勢 w、p、r との差分を教示操作盤 4 の表示部や図示していない、このロボット制御装置に接続されたパーソナルコンピュータの表示部に表示する（ステップ S 15）。

【0036】次に、最終回転角 θ と、ステップ S 6 で求めた補正開始時の回転角 θ_{st} との差の絶対値が設定しきい値 θ_{max} 以上か判断し（ステップ S 16）、しきい値 20 θ_{max} 以上であれば、アラームを出力し、ロボットにブレーキをかけ各軸サーボモータに減速のトルクの命令を出力し急停止させる等のアラーム処理を行う（ステップ S 18）。一方、設定値 θ_{max} 以上でなければ、最終回転角 θ からステップ S 5 で求めた初期の回転角 θ₀ を減じて、教示操作盤上の回転角（教示指令上の回転角） j を求め記憶する（ステップ S 17）。

【0037】次に、図 3 に示すような、リンク全体がたわむ点をも考慮して補正する場合の第 2 の実施形態について説明する。この第 2 の実施形態においては、図 5 に示す処理フローチャートで示される処理と相違する点は、次の点である。

①. ステップ S 4において、Δ α、Δ β、Δ θ 以外に図 3 に示すようなリンク全体のたわみ角 γ をも算出する。このたわみ角 γ は、ステップ S 3 で求めた Z 軸回りのトルク T_z を予め設定されている、リンクのたわみを求めるための係数 k_{z'} で割ってたわみ角 γ を求める。

【0038】γ = T_z / k_{z'}

②. ステップ S 6、ステップ S 12、ステップ S 8 の逆変換処理、順変換処理は（2）式で示す座標変換行列 A を使用する。

③. ステップ S 6、ステップ S 12 の逆変換処理では、（2）式で示す座標変換行列 A における γ の値は「0」とする。すなわち上述したように、たわみのない状態であるから γ_s = 0 とするものである。

【0039】以上の点が相違するのみで他は前述した関節部のたわみのみを考慮した場合と同一である。

【0040】すなわち、当該時点で指令されている目標位置姿勢（教示点、補間点） x を読み出すと共に、各関節の軸角度、実軸速度を読み取り、Newton-Euler 法

法を用いて関節部の各軸回りのトルク T_x、T_y、T_z を求める。これらのトルク T_x、T_y、T_z を予め設定されているバネ定数 k_x、k_y、k_z で割り各軸回りのねじれ Δ α、Δ β、Δ θ を求めると共に、トルク T_z を設定係数 k_{z'} で割ってリンクのたわみ角 γ を求める（ステップ S 1～S 4 に対応）。

【0041】γ = T_z / k_{z'}

次に、ねじれがないときの修正 D-H パラメータ α_s、β_s、θ_{0s} にそれぞれ Δ α、Δ β、Δ θ を加算して、たわみ（ねじれ）を考慮した修正 D-H パラメータ α、β、θ₀ を求め、さらに γ については先に、γ = T_z / k_{z'} として先のステップ S 4 で求めた値とする（ステップ S 5 に対応）。

【0042】次に、修正 D-H パラメータ α_s、β_s、θ_{0s} 及び γ = 0 を用いて 2 式の座標変換行列 A より逆変換を行って目標位置姿勢 x から回転角 θ' を求める。この回転角 θ' を補正開始時の回転角 θ_{st} として記憶する（ステップ S 6 に対応）。

【0043】修正 D-H パラメータ α、β、θ₀、及び γ の値を用い 2 式の座標変換行列 A を用いて順変換して θ' より位置姿勢 x' を求める。目標位置姿勢 x との差 Δ x (= x' - x) を求め、目標位置姿勢 x からこの差 Δ x を引き新たな目標位置姿勢として、パラメータ α_s、β_s、θ_{0s} 及び γ = 0 を用いて 2 式の座標変換行列 A より逆変換を行って目標位置姿勢 x から回転角 θ' を求め更新する（ステップ S 8～S 13 に対応）。以下、この順変換と逆変換を交互に行い、上記差 Δ x が基準値 T より小さくなるか、又は上記順変換、逆変換の繰り返し処理が設定数 N_{max} を越えたときには、求めた回転角 θ' を最終的回転角 θ として記憶し、上記目標位置姿勢と求めた位置姿勢との差 Δ x を表示器に表示し、回転角 θ 補正開始時の回転角 θ_{st} がしきい値 θ_{max} 以上か判断し、以上ならばアラーム処理を行い、以上でなければ、求めた回転角 θ から初期の回転角 θ₀ を減じて教示操作盤に表示する回転角、すなわち、指令の回転角 j を求める（ステップ S 14～S 18 に対応）。

【0044】以上が、関節部のたわみ（ねじれ）、さらには、関節部のたわみ（ねじれ）にリンク自体のたわみをも考慮して、これらのたわみを補正してロボットを目標位置姿勢に位置決めするための各関節部の回転角 j を求める処理である。これら処理を、サーボ制御の割り込み周期よりも長い割り込み周期で行う場合もある。この場合には、教示プログラムを実行し得られた目標指令位置姿勢としての教示点、補間点に対して上記処理を実行し、まず最初は、上記処理を 2 回行い、たわみ（ねじれ）補正された回転角 j を 2 つ求め、その間を補間して、各関節部のサーボ制御器 5a1～5a6 に出力しサーボモータ M1～M6 を駆動制御する。以後は、順次、当該周期の上記処理によって得られた新たな回転角 j と 1 つ前の周期の上記処理によって得られた回転角 j との間を

11

内挿補間して、各関節部のサーボ制御器 S a1～S a6に出力する。すなわち、上記たわみ（ねじれ）補正周期の 2 周期分遅れて、実際のロボットは動作開始することになる。

【0045】上記実施形態では、ロボットの関節部における座標系の X、Y、Z 軸回りのねじれ（たわみ）、さらにはリンク自体のたわみについて補正するようにしたものであるが、関節部以外の部分で弾性があり、この部分でねじれ（たわみ）が生じるような場合には、この部分にダミーの座標系（関節部）を作り、ロボットの軸数 10 が増加したものとして、上述した図 5 の処理を行えば良い。この場合、実際にはこのダミー部分にはアクチュエータとしてのサーボモータがないものであるから、指令する回転角 θ は「0」である。

【0046】又、ロボットのアーム先端に取り付けられるツールにおいて剛性が弱い部分がある場合には、この弱い部分の軸を教示操作盤 4 より指定し入力する。例えば、この軸を直線式で表して入力する。又このツールの重さ形状なども入力しておく。そして、この軸の直線式に基づいて、この剛性の弱い部分をダミーの関節部とし 20 上述した方法で、この弱い部分のたわみも補正する指令を出力するようとする。

【0047】さらに、上記実施形態においては、関節部の座標系における各軸回りのトルク T_x 、 T_y 、 T_z を Newton-Euler 法を用いて計算により求めたが、力センサやトルクセンサを用いてこの各軸回りのトルク T_x 、 T_y 、 T_z を検出しても良く、この場合には、上記図 5 に示す処理においては、ステップ S 2、S 3 の処理をこれらセンサから得られた力またはトルクとすれば良い。 30

【0048】さらに、本発明はパリ取り等のロボットの手先を対象物に押し付け作業動作を行うロボットにおいて、この押し付けによって生じるたわみについて補正する場合にも適用できるものである。この場合には、上述したようなセンサで押し付けによる反力を検出し、この反力に基づいて、上述した補正処理を行うことにより、外力によるたわみから発生する手先位置のずれをも補償するようとする。

【0049】さらに、上記実施形態では、教示プログラムが直交座標系上の位置でプログラムされている例を示 40 したが、各関節軸の回転角で教示されている教示プログラムの場合では、ステップ S 1 で、各関節軸の指令回転

12

角 θ を読み、回転角 θ に変換し、これをステップ S 6 では、回転角 θ' 及び θ_{st} として、回転角 θ' より順変換して直交座標系上の位置姿勢 x を求める処理となる。他は図 5 に示す処理と同一である。

【0050】

【発明の効果】本発明においては、多関節の柔軟アームのロボットにおいて発生するたわみを補正して、該ロボットを高精度に高速で動作させることができる。関節部のねじれだけでなく、リンク全体がたわむことによる変化する姿勢の影響をも考慮した補正を行うことにより、更に高精度な動作を行うことができる。万一、補正量が異常に大きくなった場合にも、アラームを発生させることにより、急激な動作を行わないようにすることができる。

【0051】補正の計算時間がサーボ制御のための計算周期では間に合わない場合には、サーボ制御のための計算周期よりも長い周期で補正の計算を行うことができ、サーボ制御自体の性能を下げる必要がない。又、手先の目標位置とのずれ及び／又は手先の目標姿勢とのずれを表示することにより、ロボットの精度や剛性を知ることができます。ロボット本体だけではなく、必要に応じて、ロボットの手先に取り付けられたツールに生じるたわみを補正することもできる。取得したデータから剛性パラメータを簡単に計算で求めることができ、わずらわしい調整作業が不要である。ロボット手先を押し付けて作業するアプリケーションにおいても、高精度な動作が可能である。

【図面の簡単な説明】

【図 1】修正ローハパラメータの説明図である。

【図 2】関節部の座標系における各軸回りのトルクの説明図である。

【図 3】リンク自体のたわみの説明図である。

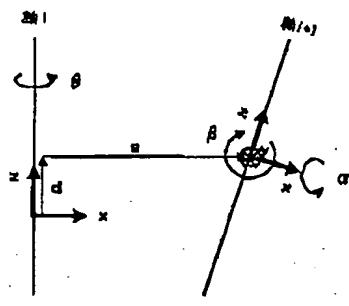
【図 4】本発明の一実施形態のロボット制御装置の要部説明図である。

【図 5】同実施形態におけるたわみ（ねじれ）補正処理のフローチャートである。

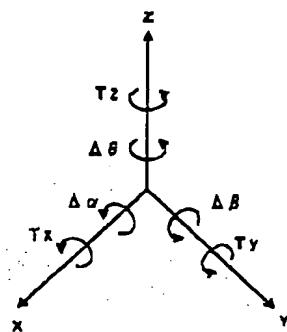
【符号の説明】

- 1 メインCPU
- 2 メモリ
- 4 教示操作盤
- 5 サーボ制御部
- M1～M6 サーボモータ

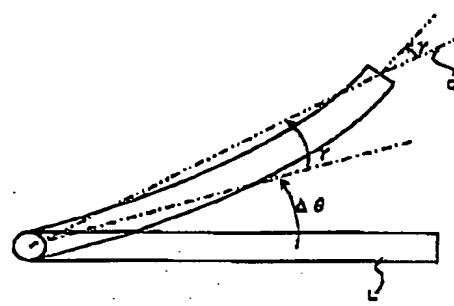
【図 1】



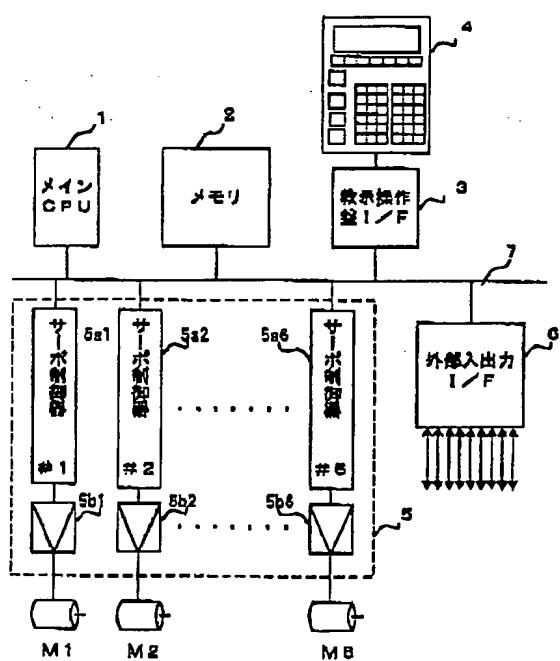
【図 2】



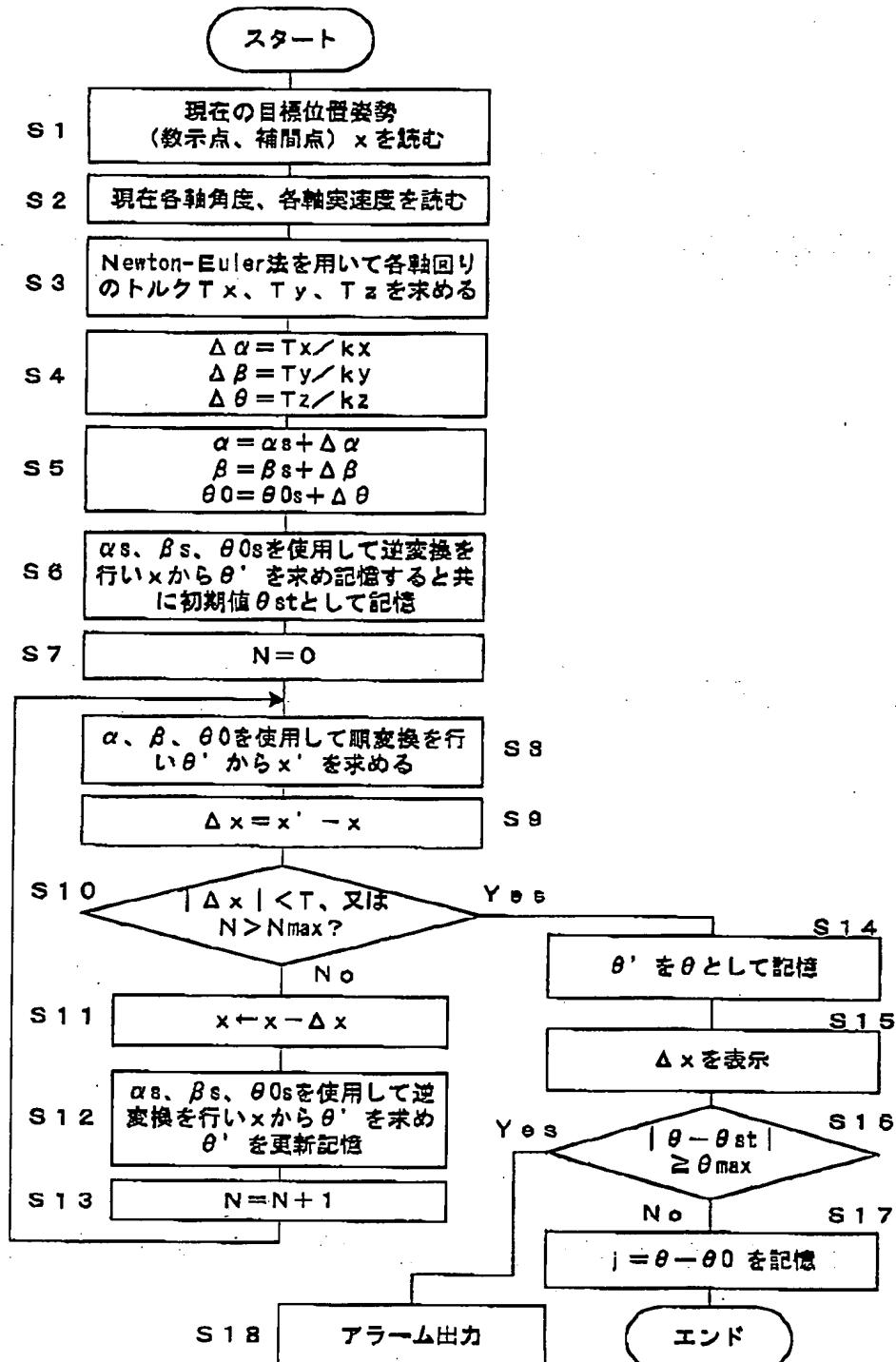
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(72)発明者 土田 行信
山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580番
地 ファナック株式会社内

F.ターム(参考) 3C007 AS01 AS06 KS16 KS20 KS21
KS34 KS35 LT11 LT13 LV04
LV05 LV23 MT04
5H269 AB33 BB03 CC09 EE05 EE11
FF06